

DSP를 이용한 브러쉬 없는 선형 모터 드라이브 구현

김상우*, 박정일**, 이기동**, 이석규**, 정재한***

Implementation of Brushless Linear Motor Drive using DSP

Sang Woo Kim*, Jung Il Park**, Ki Dong Lee**, Suk Gyu Lee** and Jae Han Jung***

ABSTRACT

In this paper, a controller design for brushless linear motor is implemented. The designed controller is mainly composed of current, speed and position controller, which are carried out by the high-speed digital signal processor (DSP). In addition the PWM inverter is controlled by space voltage PWM method. This system is implemented by using 32-bit DSP (TMS320C31), a high-integrated logic device (EPM7192), and IPM (Intelligent Power Module) for compact and powerful system design. The experimental results show the effective performance of controller for the brushless linear motor.

Key Words : Digital Signal Processor (이산신호처리기), Erasable Programmable Logic Device (삭제 입력 가능한 논리소자), Intelligent Power Module(지능형 전력소자)

1. 서론

현대 사회에서 산업화가 진행됨에 따라 생산성의 중요도가 매우 커지게 되었다. 이에 생산성 향상을 위한 고속 수송 및 반송을 위한 공장 자동화 장치들에 회전기를 이용한 고속화가 최근까지 추진되어 왔다. 그러나 회전기를 직선 수송 및 반송을 위한 작업에 이용하기 위해서는 회전 운동을 직선운동으로 변환시켜 주는 변환장치가 필수적이므로 이에 의한 제작 상의 비용 및 난점, 변환기의 마찰 등에 의한 운동에너지의 손실 및 오차 등으로 인해 그 성능 향상 연구에 한계가 있다는 것을 알게 되었다^[1]. 이에 직선 운동 기기의 개발에 대한 필요성이 증대되었고 그에 따라 차량이나 반송차에 직접적으로 직선운동을 가할 수 있는 선

형 모터가 위의 문제들을 해결하기 위한 좋은 방법 중의 하나로 부각되었다. 이들 선형 모터중 선형 직류 모터(Linear DC Motor)는 구조가 간단하고 추력 정수가 일정하여 포화가 적으며, 권선의 인덕턴스가 작고 전기적 시정수가 작은 장점을 가지고 있으므로 산업 현장에 적용하기에 유용하다^[2]. 그러므로 이와 같은 장점들에 의하여 교통 차량용 기기, 산업용 기기, 사무 자동화 기기와 같은 고속, 고정밀이 요구되는 산업 분야에 많이 적용되고 있으며 특히 높은 제어 성능과 고속, 고효율이 가능하다는 장점 때문에 수직, 수평의 장거리 운송시스템에 적합한 것으로 연구, 보고되고 있다.

실제로 회전형 모터에서 운동변환장치를 이용하여 직선운동을 얻을 때 이는 기계적인 변환 장

2001년 1월 18일 접수
* 영남대학교 대학원 전기공학과
** 영남대학교 전자정보공학부
*** 삼익공업주식회사

치에 대한 내구성, 고속성 및 정밀도에 한계를 가지게 되므로 고속의 고정밀 직선 운동 서보 기구로서는 부적당한 점이 있다. 이는 생산성 향상을 위하여 작업의 고속화와 고정밀화를 추진하고 있는 현재의 요구에는 상반되는 특징이다. 즉 직선 운동을 통한 작업에 있어서 고속이고 고정밀이 필요한 곳에서는 선형 모터의 채용이 불가피하며 빠른 속도로 발전하고 있는 센서 및 제어 기술과 부합하여 더 빠르고 정밀한 서보 제어 기구를 만들 수 있게 되었다^[3].

본 연구에서는 선형 모터의 장점인 직선 운동에서의 고속, 고정밀 특성을 제대로 발휘시킬 수 있는 구동용 제어 장치인 driver를 설계 제작하는데 그 중점을 두고 CPU는 DSP(TMS320C31)를 사용하고, 인버터 스위칭 소자로는 IPM을 사용하여 drive를 구성하였으며, 전류, 속도, 위치 제어를 수행하여 그 성능 결과를 검증하였다.

2. 하드웨어

선형 모터를 구동하는 시스템의 구성은 Fig. 1과 같다. 제어대상인 선형모터에 에너지를 공급하는 전력변환부 및 전원공급 장치, 이를 제어하는 프로그램이 실행되는 마이크로 컨트롤러 (DSP, ROM, RAM) 및 그리고 주변 회로를 구성하고 있는 EPLD로 구성되어 있다.

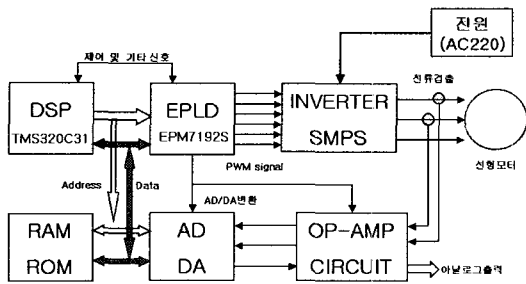


Fig. 1 Block diagram of the system

2.1 마이크로 컨트롤러부

2.1.1 CPU 부

마이크로 컨트롤러부에서는 전체 시스템의 두뇌에 해당하는 부분으로 속도제어, 전류제어, 위치 제어 및 기타 입출력 제어 등을 수행한다. 따라서 여러 가지의 입출력 데이터인 속도, 전류, 위치 데

이터를 연산 처리 하며, 또한 전류 및 전압 계산 경우 좌표변환 등을 실시간으로 처리해야 한다. 이러한 연산 처리는 대부분 부동소수점 및 삼각함수 등의 많은 연산을 필요로 한다. 따라서 부동소수점 연산 경우 Texas Instrument사의 32비트 DSP 소자인 TMS320C31을 사용하여 제어주기내에서 충분히 연산 처리 가능하도록 하였다^[4].

2.1.2 EPLD 부

마이크로 컨트롤러부에는 선형 모터와 전력 변환부 사이에 동작명령이나 전류 검출, 마이크로 컨트롤러의 상태를 외부에 표시하거나 외부의 컨트롤러에서 각종 지시를 받아서 수행할 수 있는 입출력 기능을 수행한다. 이를 위하여 CPU주변에는 메모리 및 각종 디지털 IC로 구성되는 CPU관련 회로들이 필요하다. 이에 고집적회로인 EPLD(erasable programmable logic device)를 사용하여 각종 입출력 기능 및 주변회로를 구성하였고, 기능과 역할은 다음과 같다^[5].

- ① 어드레스 디코더
- ② 웨이트 발생기
- ③ 인터럽트 신호처리
- ④ 디지털 입출력
- ⑤ 모터 위치 카운터
- ⑥ 모션 위치 카운터
- ⑥ PWM발생회로
- ⑦ 방향 판별 및 엔코더 4채배 회로
- ⑧ 기타 회로

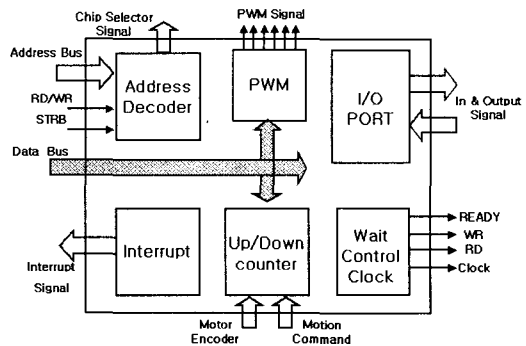


Fig. 2 Block diagram of EPLD

Fig. 2는 EPLD의 기능을 블록별로 정리한 것이다. 실제로는 각각의 블록내부에는 다양한 기능을 수행하기 위한 회로들로 구성되어 있다. 이러한 회로를 구성하기 위하여 ALTERA사의 EPM7192S 160-15nec 소자를 사용하였으며, 회로구성은 AHDL (Altera Hardware Description Language)과 SCHEMATIC 방법을 적절히 조합하여 구성하였다. 그리고 각각의 기능을 회로에 실장 하기 전, 시뮬레이션 과정을 통하여 회로의 타당성을 사전에 검증하였다. 또한 이 소자 경우 ISP(In System Program) 기능이 지원되므로 기판에 실장 하더라도 차후에 회로 변경이 필요한 경우 다른 부가 장치 없이 변경이 가능하다.

2.1.3 Analog 회로부

모터를 제어는 경우 상전류의 신호 측정이 필요하며, 또한 외부 아날로그 입력을 위한 회로 및 모터의 파라미터 출력을 위한 아날로그 출력회로 구성 필요하다. 이를 위하여 drive에 다음과 같은 아날로그 회로부를 구현하였다.

- ① 전류 측정(아날로그신호를 디지털신호로 변환)
- ② 전압 출력(아날로그 출력)

AD변환기 경우는 MAXIM사에서 제공하는 4채널 동시 변환이 가능한 MAX125를 사용하고 있으며, 실제 4개의 채널중 2개는 전류의 값을 측정하고 나머지 2개는 아날로그 입력으로 외부의 상위제어기에서의 제어신호를 받는데 사용한다. 그리고 DA변환기 경우도 Analog Device사에서 제공하는 AD7226를 사용하였다. DA변환기 경우 4채널 출력이 가능하면 실시간으로 파라미터를 관측하는데 아주 유용하게 사용된다.

2.1.4 통신 회로부

TMS320C31 경우 비동기식 통신을 지원하지 않으므로 비동기식 통신을 위하여 외부에 전용 소자를 추가하여야 한다. 본 연구에서는 이를 위하여 AMD사의 85C30을 사용하여 비동기식 통신을 지원한다. 이를 사용하여 모터를 구동시 다양한 파라미터를 실시간 또는 off-line 형태로 PC로 전송하여 파라미터를 관측할 수 있게 하였다.

Fig. 3은 설계되어진 마이크로 컨트롤러의 구성도를 보여준다.

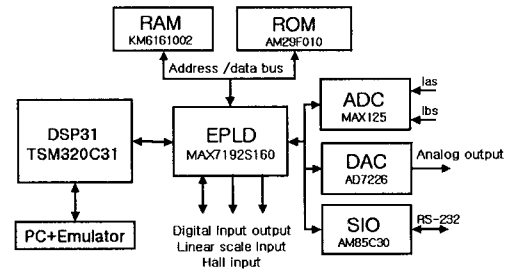


Fig. 3 Micro controller and peripheral circuits

2.2 전력변환부

전력변환부는 마이크로 컨트롤러의 지시를 받아 선형 모터에 구동에 적합한 가변주파수 및 전압의 교류 전원으로 공급하는 부분이다. 전력변환부는 크게 정류회로, 인버터 회로, 전원 공급장치 등으로 구성되어 있다^[6].

2.2.1 인버터부

인버터 경우 빠른 응답특성과 출력전압 또는 출력전류에 고조파가 성분이 적을 것이 요구되며, 특히 서보제어용으로 사용되는 것을 전제로 하면 매우 빈번한 기동, 정지 및 속도변화가 이루어지므로 충분한 과부하 내량을 갖도록 설계되어야 한다. 또한 전체 구동장치의 외형의 크기는 대부분이 전력변환부에 의하여 결정되므로 가급적 소형화를 지향하는 집적형 설계가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 Mitsubishi의 IPM소자를 사용하였으며, 정격용량은 600[V], 15[A]이다. IPM은 시스템의 요구에 맞도록 설계된 IGBT칩, IGBT를 최적의 상태로 구동, 보호가 가능한 전용 IC, 노이즈나 서지 전압 대책을 고려한 고집적 패키지 기술을 융합한 것이다. 또한 자체적으로 게이트 드라이버 회로 및 각종 보호회로가 내장되어 있어 사용하기 편리하다. 그러나 구동을 위한 다수의 전원회로가 필요하다.

2.2.2 전원공급부

스위칭 모드 파워 서플라이(Switching Mode Power Supply ; SMPS)는 전력용 트랜지스터 등 반도체 소자를 스위치로 사용하여 직류 입력 전압을 구형파 형태의 전압으로 변환한 후 필터를 통하여 제어된 직류 출력 전압을 얻는 장치이다. 이

때 직류 출력 전압의 제어는 스위치의 ON, OFF 시간을 제어함으로써 이루어진다. SMPS의 동작은 직류입력에서 직류출력으로의 변환을 하고 있으므로, DC-DC converter라 부르기도 하며, 스위칭 레귤레이터(switching regulator)라고도 한다. Table 1에서 설계되어진 전원부의 사양을 볼 수 있다.

Table 1 Specification of SMPS

컨버터방식	RCC제어형의 flyback converter
스위칭방식	MA4820(5A/800V)
제어방식	+5V 출력전압 feedback에 의한 정전압제어 및 과전압 보호기능
스위칭주파수	50khz ~ 300khz
입력전압	220전용(AC170V~270V)
출력전압	+5V/2A(정전압 제어),+5V/0.5A, 15V/0.3A×4개,±15V/0.3A×2개
출력전력	약 60W

3. 소프트웨어

3.1 주 프로그램

주 프로그램에서는 우선 변수 초기화, 인터럽트 설정 및 EPLD내부 회로등을 초기화한다. 또한 2개의 상전류를 측정하여 전류의 offset을 계산하여 전류 측정에서 발생하는 오차 성분을 보상한다. 모터를 구동하기 위해서는 초기에 이동자의 위치 정보가 필요하다. 따라서 홀 센서로부터 신호를 검출하여, 현재 이동자의 위치구역을 판별하여 초기 위치 설정을 한다. 이러한 초기화 수행 이후 프로그램은 메인부를 수행하며, 메인부에서는 무한 루틴을 반복 수행하며, 동시에 과전류를 검사하고 이상이 있으면 시스템을 정지시킨다. 이러한 메인 루프 수행과 동시에 일정 시간마다 타이머 인터럽트에 의하여 100 μ s마다 전류 제어부, 500 μ s마다 속도제어부, 1000 μ s 위치제어부가 수행된다.

3.2 전류제어

타이머 인터럽트에 의하여 일정시간마다 전류 제어부가 수행되면, 먼저 A/D변환기를 통하여 측정된 신호로부터 상전류 i_{as}, i_{bs}, i_{cs} 계산을 계산한다. 그리고 현재의 이동자의 위치를 측정하여 $\sin \theta_m, \cos \theta_m$ 를 계산한다. 이를 이용하여 3상의

고정좌표계의 상전류 i_{as}, i_{bs}, i_{cs} 를 동기 회전좌표계로 변환하 i_{ds}, i_{qs} 를 계산한다. 이렇게 계산된 전류값 i_{ds}, i_{qs} 과 기준전류 i_{ds}^*, i_{qs}^* 를 비교하여 전류 PI제어기를 사용하여 보상한다^[7,8]. 전류제어부에서 계산된 v_{ds}, v_{qs} 로부터 공간전압형 PWM방식으로 전류제어를 위한 스위칭 패턴을 얻는다. 계산과정 통하여 계산된 결과값은 EPLD내에 구성된 PWM회로를 통하여 실제 출력된다^[9]. PWM회로경우 10bit분해능이며, PWM에 사용되는 기준클럭은 외부 클럭 발진소자를 이용하지 않고 DSP에서 출력되는 h1을 사용하며, PWM의 주기는 100 μ s, 주파수로는 10Khz이다.

3.3 속도 및 위치제어

속도제어부 소프트웨어의 주기는 전류제어부 주기의 5배이며, 500 μ s의 주기로 수행된다. 속도 제어부에서는 현재 속도를 계산하여 기준 속도와 비교하여 PID제어로 수행된다. 또한 위치제어 경우 약 1000 μ s마다 수행되는 PD제어기로 구성되어 있다^[10].

4. 실험 및 고찰

Fig 4.에는 설계 되어진 drive와 제어대상인 선형 모터를 볼 수 있으며, drive는 2층의 구조를 가지며 상층부에는 마이크로 컨트롤러 하층부에는 전력변화부로 구성되어 있다. 제작된 drive의 사양이 Table 2에서 보여진다.

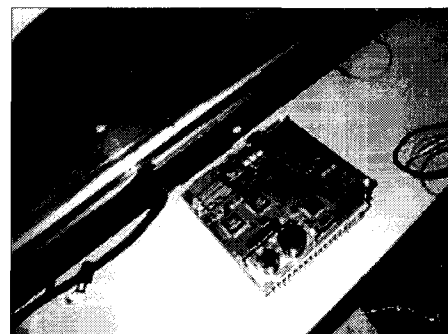


Fig. 4 Linear motor and drive

Table 2 Specification of the drive

용량	200W
전원	AC220V(단상)
출력	정현파 PWM제어
제어부 구성	디지털 제어

본 연구에서 설계되어진 drive의 성능을 검증하기 위하여 무부하 경우에 대한 실험으로 Table3의 사양을 가지는 선형 모터에 적용하여 drive의 성능을 검증하였다. 실험결과는 전류, 속도 데이터는 실시간 측정값이고, 속도, 위치 제어결과는 측정 데이터의 정밀도를 높이기 통신을 사용하여 데이터를 PC에서 처리하였다.

Table 3 Specification of the linear motor

이동자 저항	23.5 Ω
이동자 인덕턴스	13.6 mH
추력상수	59.56 N/A
이동자 질량	3.5 Kgf
Stroke 길이	1m
엔코더 분해능	5 μ m
자석 배치	양극 배열

전류제어 경우 추력을 직접 발생하는 역할을 수행하며 제어기의 가장 내부(inner loop)에 있다. 따라서 모터를 제어하는 경우 내부 제어 성능이 우선 검증되어야 한다. 이러한 성능의 Fig. 5와 Fig. 6을 통하여 확인할 수 있다. Fig. 5 전류제어의 성능에 대한 step응답을 보여주고 있으며 Fig. 6은 A, B상의 정현파 전류제어 응답을 보여준다.

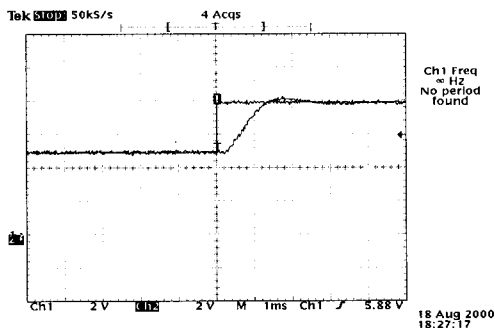


Fig. 5 Step response of iqs (iqsref=2.0A)

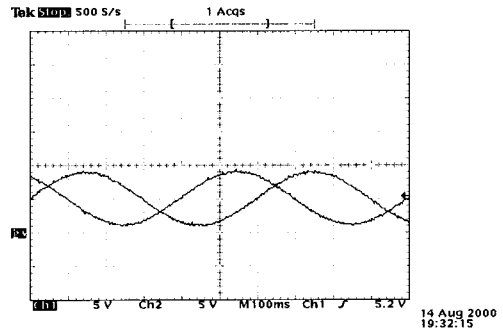


Fig. 6 Current response of A,B phase

속도제어 경우 Fig. 7에서 Step 속도 입력에 대한 drive 응답에서 overshoot 발생 없이 주어진 기준입력을 추종함을 알 수 있다. 또한 가속도 응답의 경우는 Fig. 8에서 1G이상을 충족시키며, Fig. 9에서는 4G 만족하는 응답특성을 보인다. 실험결과 drive의 가속도 능력의 우수함을 알수 있었다. 그리고 제어기의 이득은 시행착오를 통하여 설정되어졌다.

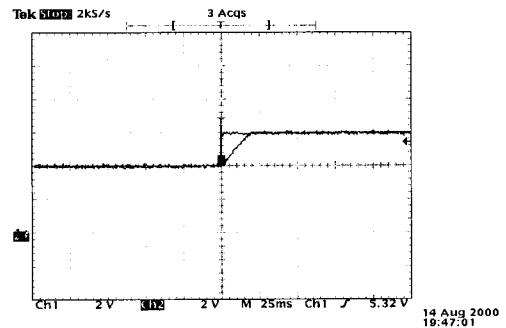


Fig. 7 Velocity response (Velocity reference=0.5m/s)

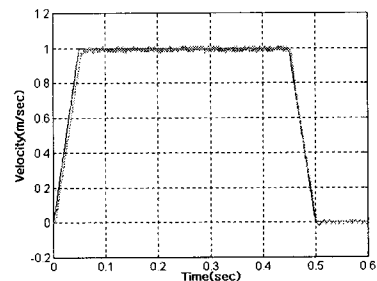


Fig. 8 Velocity response (Velocity reference=1.0m/s)

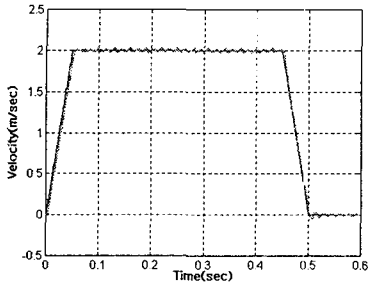


Fig. 9 Velocity response (Velocity reference=2.0m/s)

위치제어 경우 사다리꼴 형태의 입력패턴을 사용하며, Fig. 10에서는 기준 위치 입력값과 응답을 동시에 보여주고 있으며, 제어결과 오차의 거의 없는 것처럼 보인다. 이에 오차를 확대한 Fig. 11의 응답에서 Tracking 오차의 값을 알 수 있으며, 위치제어결과에서 settling time은 overshoot를 포함한 약 0.025sec의 시간이 소요된다. 제어 결과는 실험 수행동안 메모리에 데이터를 저장후 Off-line상태에서 PC로 전송하여 처리하였다.

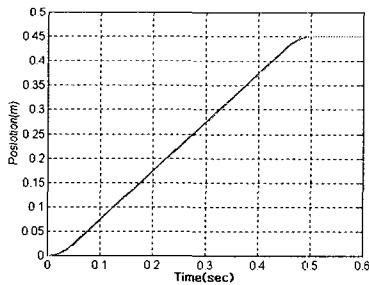


Fig. 10 Position Reference

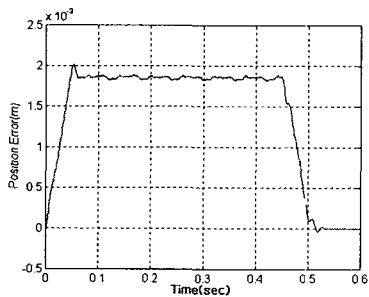


Fig. 11 Position error

5. 결론

본 논문에서는 선형 모터 구동을 위한 drive를 설계 제작을 하였다. 제작된 drive는 DSP에 의해서 구현되는 전류제어, 속도제어 및 위치제어를 수행하며, 인버터 구동방식은 공간전압형 PWM변조 방식을 사용하여 구동하였다. 또한 이러한 기능을 효과적으로 수행하기 위해서 IPM과 EPLD등을 사용하여 주변회로와 전력변환부를 구성하였다. 그리고 제어대상인 선형 모터에 적용하여 전류, 속도, 위치응답을 통하여 성능을 검증할 수 있었다.

참고문헌

1. 백수현, "소형 모터 설계 편람," 세화출판사, 1988.
2. Jack F.Giera and Zbigniew J.Piech, "Linear Synchronous Motors," CRC Press, 1999.
3. Hidehiko Sugimoto, Masato Koyama and Shinzo Tamai, "AC servo system의 이론과 설계의 실제," 종합전자출판사, 1990.
4. TMS320C3X User's Guide, Texas Instrument, 1992.
5. Altera Data Book, Altera Corporation, 1993.
6. 아경산업 자동화연구소 "서보모터 제어이론과 실습," 성안당, 1999.
7. Werner Leonhard, "Control of Electrical Drives," Springer, 2nd. Ed.1996.
8. Krause, C. K., Wasynczuk, O., "Electromechanical motion device," McGraw Hill, 1989.
9. J. W. Choi, S. K. Sul, "Inverter Output Voltage Synthesis Using Novel Dead Time Compensation," IEEE, Transactions on Power Electronics, Vol. 11, pp. 221-227, March 1996.
10. Franklin, Powell, Emami-Naeini, "Feedback Control of Dynamic Systems," Addison Wesley, 1994.